

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Сидоров О.Ю., Сарапулов Ф.Н., Сокунов Б.А.

Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Нижний Тагил,
Россия, sidorov-ou-62@yandex.ru

Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,
Россия, sarapulovfn@yandex.ru

Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,
Россия, sokynovba@yandex.ru

Аннотация: Проведены расчеты электромагнитного, гидродинамического и температурного полей кристаллизующегося слитка диаметром 163 мм. Получена полная картина динамики кристаллизации. Вычислены скорости кристаллизации в различных слоях металлического расплава. Выявлена взаимосвязь между структурой слитка и скоростью кристаллизации.

Ключевые слова: Электромагнитное поле, гидродинамическое поле, температурное поле, кристаллизация, скорость кристаллизации, структура слитка.

Abstract: The calculations of the electromagnetic, hydrodynamic and temperature fields crystallized melt with diameter 163 mm. Obtained full picture of the dynamics of crystallization. Calculated speed of crystallization of the different layers of the metal melt. The interrelation between the structure of ingot and the crystallization rate.

Key words: Electromagnetic field, hydrodynamic field, temperature field, crystallization, speed of crystallization, structure of the ingot.

Применение бесконтактного электромагнитного воздействия на кристаллизующийся металлический расплав позволяет получить металлическую заготовку с повышенными механическими характеристиками. Это выражается в измельчении зерна, выравниванию химического состава по объему слитка. Как известно (см., например, [1]), величина зерна связана с локальной скоростью охлаждения.

В исследовании ставятся следующие задачи:

1. Моделирование процесса кристаллизации металлического расплава в электромагнитном внешнем поле, что предполагает:

- расчет электромагнитного поля;
- расчет гидродинамического поля;
- расчет температурного поля.

2. Получение картины кристаллизации в динамике и определение локальных скоростей кристаллизации.

3. По результатам моделирования сделать вывод о структуре закристаллизованного слитка.

В качестве объекта исследования рассмотрен электромагнитный кристаллизатор для литья латуни

Л 63 в виде цилиндрической заготовки диаметром 163 мм [2].

Магнитопровод ЦЛИМ имеет следующие размеры:

Длина	$L = 0,255$ м
Высота	$h = 0,138$ м
Ширина	$b = 0,095$ м
Высота спинки	$h_{cn} = 0,057$ м
Высота паза	$h_n = 0,081$ м
Высота меди в пазу	$h_M = 0,079$ м
Ширина паза	$b_n = 0,025$ м
Ширина зубца	$b_3 = 0,015$ м
Зубцовый шаг	$t_3 = b_n + b_3 = 0,04$ м

Катушки обмотки были выполнены из медной ленты 23 x 0,98 мм, что привело к повышению коэффициента заполнения паза медью по сравнению с моделями и полупромышленными образцами с $\kappa_m = 0,46$ до $\kappa_m = 0,57$. Число витков в катушке $N = 55$. Схема соединения обмоток: AAZZBBXXCCYY. Плотность тока: 3 А/мм². Жидкий металл кристаллизуется в водоохлаждаемой гильзе. Другие характеристики электромагнитного кристаллизатора описаны [2].

Кратко рассмотрим основные методы, используемые в исследовании. При этом применялась цилиндрическая система координат и предполагалось наличие цилиндрической симметрии.

Методика расчета электромагнитного поля

Использовался метод конечных разностей, в котором учтены движение вторичного элемента и возникающие во вторичном элементе (ВЭ) индукционные токи. В качестве исходного выберем уравнение [3]

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{A_\varphi}{\mu r} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right) + \beta \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} + \alpha \cdot \left(\frac{A_\varphi}{r} + \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} \right) + j \cdot \omega \cdot \gamma \cdot A_\varphi = J_\varphi \quad (1)$$

с граничными условиями $A_\varphi = 0$ при $r = 0$, $r = \infty$ и учетом непрерывности тангенциальной компоненты напряженности электрического поля и нормальной компоненты магнитной индукции при переходе из одной среды в другую. Кроме того, в уравнении (1) $\beta = -\gamma \cdot w$ и $\alpha = -\gamma \cdot u$. Методика решения уравнения (1) подробно изложена в работах [3,4].

Методика расчета гидродинамического поля

Уравнения движения жидкости для расчета гидродинамического поля кристаллизующегося слитка с цилиндрической симметрией можно записать в виде [4,5].

$$v^* = v^0 + \Delta t \left\{ -v \frac{\partial v}{\partial r} - w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho} F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right) \right\}; \quad (2)$$

$$w^* = w^0 + \Delta t \left\{ -v \frac{\partial w}{\partial r} - w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{\rho} F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + v_t \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right\}. \quad (3)$$

В уравнениях (2) и (3) v и w - компоненты скорости по координатам r и z соответственно; F_r, F_z - компоненты плотности электромагнитных сил, полученные при расчете электромагнитного поля; v_t - турбулентная кинематическая вязкость.

Неизвестную поправку к полю давления ΔP_{ij} найдем с помощью уравнения неразрывности жидкости, которое в цилиндрических координатах с учетом применения метода конечных разностей принимает вид

$$\frac{r_{i+1} \cdot v_{i+1,j} - r_i \cdot v_{ij}}{r_{i+1} - r_i} + \frac{w_{ij+1} - w_{ij}}{z_{j+1} - z_j} = 0.$$

Частные производные в этих выражениях будем вычислять в рамках метода конечных разностей с использованием шахматной сетки (см., например, [6]). Методика нахождения гидродинамического поля подробно изложена в работе [3].

Частные производные в этих выражениях будем

вычислять в рамках метода конечных разностей с использованием шахматной сетки (см., например, [6]). Методика нахождения гидродинамического поля подробно изложена в работе [3].

Методика расчета температурного поля

Распределение температур в движущейся среде в цилиндрической системе координат для осесимметричного устройства может быть описано уравнением [3]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial r} - w \frac{\partial T}{\partial z} + a_t \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_V}{\rho C_p} + \frac{L}{C_p} \frac{\partial \psi}{\partial t}.$$

Здесь q_V - мощность внутренних источников тепла (Джоулево тепло от индукционных токов); L, ψ - теплота кристаллизации и доля твердой фазы соответственно; C_p, ρ - теплоемкость и плотность соответственно.

Частные производные были аппроксимированы конечными разностями. Для интегрирования уравнения (4) применяли метод Рунге-Кутты 3-4 порядка с контролем точности решения [3]. Использовались граничные условия III-го рода.

Методика совместного решения полевых задач

Спецификой одновременного решения указанных выше задач является их различные постоянные времени. Например, установление электромагнитных процессов происходит в пределах долей секунды, гидродинамического поля - секунды или десятки секунд, температурного поля - минуты, часы. В данном случае в процессе моделирования были приняты следующие положения:

- 1) В динамике рассматривается только изменение температуры.
- 2) Для каждого поля температур (для заданного момента времени) электромагнитное и гидродинамическое поля являются установившимися, но пересчитывается с целью учета появляющейся твердой фазы в расплаве.
- 3) Для расчета гидродинамического поля используется установившееся электромагнитное поле, вычисленное с учетом движения металлического расплава слитка.

Для проведения вычислений был создан авторский пакет программ, позволяющий за разумное вычислительное время с приемлемой точностью получить необходимые результаты.

Результаты моделирования

Прежде всего, следует отметить, что скорость движения расплава практически не оказывает влияние на энергетические характеристики электромагнитного поля, что следует из проведенных в исследовании расчетов. Поэтому в электромагнитное поле рассчитывается однократно.

Результаты расчетов показали, что поле скоростей достигает установившегося режима через примерно 2 секунды после начала движения. Структура течения носит одновихревой характер (рис.1) с максимальными скоростями на оси симметрии ($r=0$), которые составляют на середине высоты около 0,74 м/с. В слое расплава максимально

приближенного к индуктору скорость на середине высоты кристаллизатора составляют около 0,38 м/с.

Было принято, что начальная температура расплава равна 1090 К, кристаллизация начинается при 1083 К и заканчивается при 1070 К. Картина кристаллизации и поле скоростей для различных моментов времени показана в рис. 1.2.

[illegible]

Рис.1. Поле скоростей и картина кристаллизации

В начальный момент времени (0 с) наблюдается одновихревая структура течения, сплав весь жидкий.

Кристаллизация начинается сверху и снизу (97 с), высота столба жидкого металла сокращается, фронт

Через 662 с в жидком состоянии остается 15 слоев расплава с элементами движения расплава в них.

continued on page 20

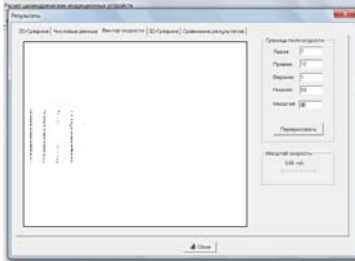
	Картина кристаллизации		
Поле скоростей	662 с	1000 с	1340 с (22,3 мин.)
662 с			
1000 с движение отсутствует			
1340 с движение отсутствует			

Рис.2. Поле скоростей и картина кристаллизации

Зависимости расчетных скоростей кристаллизации показаны на рис.3. Из него следует, что скорость охлаждения расплава носит экстремальный характер. Максимум скорости кристаллизации наиболее ярко выражен для слоев,

близких к кристаллизатору. По мере удаления от кристаллизатора и приближения к оси симметрии максимум на кривых становится более пологим.

Можно предположить, что существует взаимосвязь между максимальной скоростью

кристаллизации и величиной зерна закристаллизовавшегося слитка. Для выявления этой взаимосвязи воспользуемся результатами металлографического исследования [7]. Из последнего следует, что радиус слитка можно разделить на 3 части, в каждой из которых величина зерна примерно одинакова (отсчет ведем от внешней границы слитка к центру):

- 1-я часть: вытянутые зерна около 10 мм – скорости охлаждения около $1,6 \cdot 10^{-4}$ – $1,8 \cdot 10^{-4}$ кг/с;
- 2-я часть: вытянутые зерна около 20-30 мм – скорости охлаждения около $0,8 \cdot 10^{-4}$ – $1,4 \cdot 10^{-4}$ кг/с;
- 3-я часть: глобулярные зерна размером 10-20 мм – скорости охлаждения меньше $0,67 \cdot 10^{-4}$ кг/с.

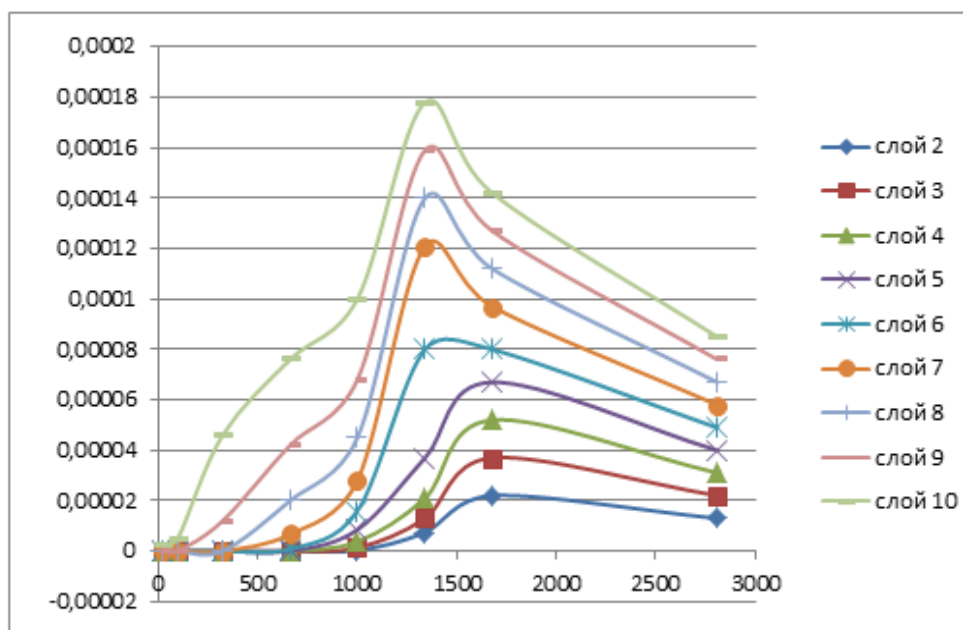


Рис.3. Зависимости скоростей кристаллизации (ось ординат, кг/с) от времени (ось абсцисс, с) для различных слоев на середине высоты металлического слитка. Нумерация слоев начинается от оси симметрии. Наиболее близок к кристаллизатору 10-й слой ($r=81,5$ мм)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены расчеты электромагнитного, гидродинамического и температурного полей кристаллизующегося слитка.

2. Впервые получена полная картина динамики кристаллизации слитка диаметром 163 мм в электромагнитном водоохлаждаемом кристаллизаторе.

3. Выявлена взаимосвязь между структурой слитка и расчетной скоростью охлаждения, что позволяет в конечном итоге определить взаимосвязь между структурой слитка и характером электромагнитного поля.

4. Предложенный подход может быть использован при проектировании устройств электромагнитного воздействия на расплав с целью получения металлических сплавов с заданной структурой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов. М.: Мир, 1967. 167 с.
2. Сарапулов С.Ф., Сокунов Б.А., Фризен В.Э. Индукционный перемешиватель алюминиевых сплавов в процессе кристаллизации // В 38 Вестник УГТУ-УПИ. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Сборник статей. Ч 2: Специальные электрические машины и электромагнитные устройства. Вопросы энергосбережения. Образовательные проекты. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. № 5 (25). С.171-174
3. Сидоров О.Ю., Семенов В.А., Сарапулов С.Ф. Конечно-разностное моделирование характеристик осесимметричного индукционного устройства // Изв.вузов. Электромеханика, 2001, №1, с. 32-35.